

生産・物流最適化技術の開発と今後の展開

Development of Production and Logistics Optimization Technology and Future Prospects



古川 昭仁

Akihito Furukawa

システムソリューション事業部 DX推進部
オペレーションズリサーチグループ



稲富 峰憲

Minenori Inatomi



杉下 聡史

Satoshi Sugishita



梅田 公範

Kiminori Umeda



片岡 俊貴

Toshiki Kataoka

システムソリューション事業部
システム2部北九州システムグループ
(DX推進部オペレーションズリサーチグループ兼務)



小島 正義

Masayoshi Kojima

システムソリューション事業部
システム3部和歌山システムグループ
(DX推進部オペレーションズリサーチグループ兼務)



小林 敬和

Hirokazu Kobayashi

日本製鉄株式会社
技術開発本部 プロセス研究所
インテリジェントアルゴリズム研究センター

近年、製造業では先進的なデジタル技術とデータの活用による業務・生産プロセス改革への対応力が、企業競争力に直結している。そのため、デジタルトランスフォーメーション（DX：Digital transformation）の取り組みによる事業環境変化への迅速・柔軟な対応が、経営の最重要課題の1つとなっている。本稿では、当社が開発・提供するDXソリューションの取り組みの中で、AIの基盤技術の1つである数理最適化を活用した生産・物流計画への応用開発の内容とその適用事例、今後の展開について紹介する。

In recent years, in the manufacturing industry, the ability to respond to the operation and production process reforms through the use of advanced digital technology and data is directly linked to corporate competitiveness. For this reason, it has become one of the most important management issues to respond to changes in the business environment rapidly and flexibly by means of Digital Transformation (DX) initiatives. In this paper, among the DX solution initiatives developed and offered by our company, we will introduce the applied development for production and logistics planning with using mathematical optimization, which is one of the fundamental technologies of AI, its application examples, and future prospects.

1. はじめに

近年、製造業においては、先進的なデジタル技術とデータの活用による業務・生産プロセス改革への対応力が企業の競争力に直結している。そのため、デジタルトランスフォーメーション（DX: Digital transformation）への積極的な取り組みにより、今後の事業環境変化へ迅速・柔軟に対応していくことが、経営の最重要課題の1つとなっている。

一方、国内の労働人口減少による人手不足が深刻化する中、とりわけ鉄鋼業においては熟練者の世代交代など構造的な事業環境変化に直面している¹⁾。そのため、熟練者に依存する計画業務や意思決定を経験の浅い若手でも実行できる強力な支援環境の構築が急務とされている。

当社においては、これらお客様の課題・ニーズに対するDXソリューション提供の加速化を図るため、AI、IoT、5G、クラウドなどの高度先進技術者を集約した専門組織「DX推進部」を2020年4月に発足し、先端技術応用分野でのソリューションの強化、適用拡大を推進している。その柱の1つとして「最適化技術の生産・物流計画への応用開発」に取り組み、鉄鋼や電力など様々なお客様向けに最適化ソリューションとして提供を実現してきた。また、さらなる効率化と高度化を目指して、汎用化技術の開発に取り組み、鉄鋼生産計画や工事計画への適用など、その効果・有用性を確認できた。そこで本稿では、その開発内容と適用事例および今後の展開について紹介する。

2. 数理最適化技術を用いた独自ツールの開発

近年、コンピュータの高速化・大容量化や最適化アルゴリズムの高速化に伴い、数学的解法である「数理最適化技術」を活用した実用的なシステム構築が可能となった。しかし、最適化システムを構築する際は、数理最適化モデルの定式化のため高度な最適化技術者が必要であった。また、モデル作成負荷も高く（ソフト数万行）、人がプログラムするためバグも発生しデバッグ作業も大変であった。

そこでこれら課題を解決するため、高度な数学的専門知識を有する技術者でなくとも、プログラムレスで簡単な画面入力のみで数理最適化モデルを自動生成できるツールを開発した。

複数工程で成り立つプラントに対して、製品などの物の流れや作業の流れをタスクとして定義し、その過程で利用される設備や装置、作業クルーなどをリソースとして定義することで計画問題の一般化を図り、生産・物流工程フローのグラフィカルな登録を可能とした（図1）。

登録された生産・工程フローは、当社独自のデータベースへ格納され、その情報を元に数理最適化モデルを自動生成する。例として、簡単なケースを次式に示す。各式は以下のような関係を表す。

・式 (1) は、各タスクの開始 T_s ～終了 T_e までの処理時間 PT を表す。

・式 (2) は、タスク $p1$ の終了以降に、タスク $p2$ の処理を開始することを表す。

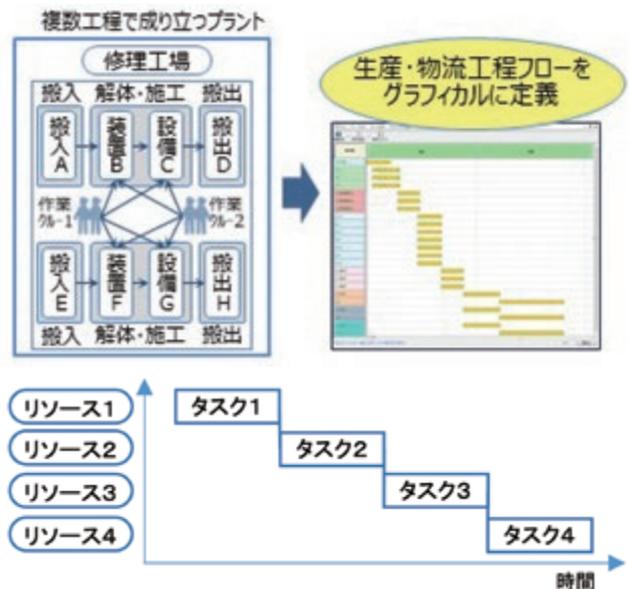


図1: 生産・物流工程フローの定義

$$T_{e_{o,p}} - T_{s_{o,p}} = PT_{o,p} \quad \forall o \in O, p \in P \quad (1)$$

$$T_{e_{o,p1}} \leq T_{s_{o,p2}} \quad \forall o \in O, p \in P \quad (2)$$

また、生産・物流工程における制約条件や目的関数を画面から簡単に登録可能（数式入力不要）とし、その情報を元に同様に数理最適化モデルを自動生成する（図2）。例として、簡単なケースを次式に示す。各式は以下のような関係を表す。

・式 (3)、(4) は、オーダー $o1$ とオーダー $o2$ が同一リソース r を同時に利用できない占有制約を表す。

・式 (5) は、各タスクの開始 T_s ～終了 T_e の滞留時間の最小化、各オーダー o の最終タスクの終了 T_e の時刻を最小化する目的関数を表す。

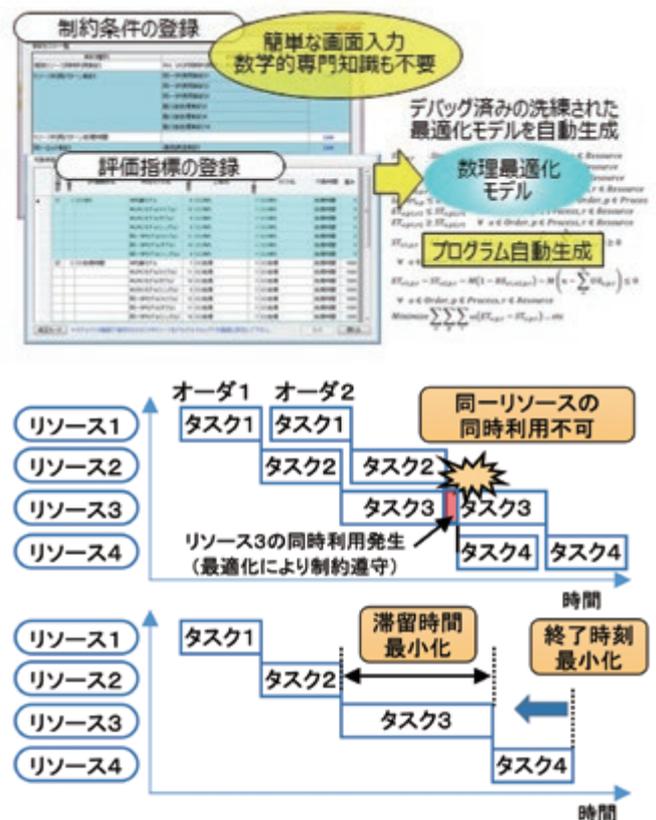


図2: 制約条件、目的関数の定義

$$Te_{o1,p} - M(1 - \delta_{o1,o2,p,r}) \leq Ts_{o2,p} \quad \forall o \in O, p \in P, r \in R \quad (3)$$

$$Ts_{o1,p} + M(1 - \delta_{o1,o2,p,r}) \geq Te_{o2,p} \quad \forall o \in O, p \in P, r \in R \quad (4)$$

$$\text{minimize } W_i \sum_o \sum_p (Te_{o,p} - Ts_{o,p}) + W_j \sum_o Te_{o,p} \quad (5)$$

これらにより、上述の生産・物流工程フローを含めデバッグ済みの洗練された最適化モデルが自動生成され、高生産・高品質なシステム構築が可能となった。また、さらに計画対実績差異の自動抽出・定量評価が可能な仕組みも構築し、操業環境変化を迅速に次のアクションに反映することで、継続的な現場力向上が可能な最適化一貫システムとして実現することができた(図3)。次項に開発した独自ツールを用いた適用事例を示す。

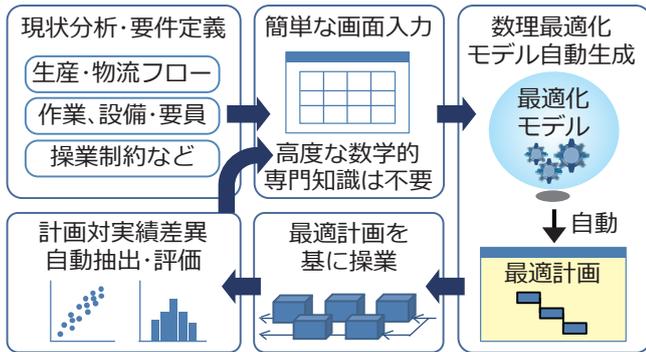


図3: 最適化一貫システム

3. 耐火物工事計画への適用事例

鉄鋼における耐火物は、溶銑・溶鋼と直接接触するため損耗が早く、定期的な修理・交換によって安定稼働させている。この修理を効率的、円滑に行うには、精度の良い計画の立案が重要である。耐火物修理場では、複数の炉設備を共通のリソース(場所、人、修理設備)で修理しており、計画作成精度向上には担当設備の枠を越えた計画立案が必要となる。また、突発での緊急修理時には、最適な計画を即時に立案することが必要となる。しかし、リソース制約を考慮した計画の全体調整には、高度な技能を要し熟練の計画担当者であっても、施工クルーの休日対応や残業対応を発生させてしまう場合がある。

本事例では耐火物を有する設備の中で、図4に示すRH

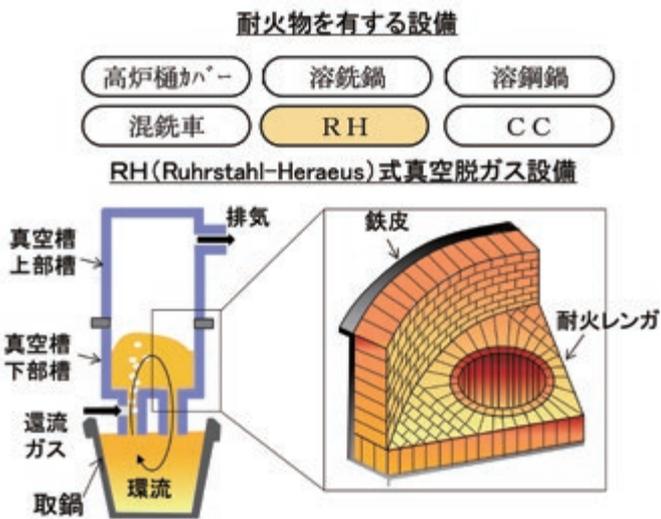


図4: 耐火物を有する設備 (RH)

(Ruhrstahl-Heraeus) の工事計画における適用事例*について述べる。RHは、転炉での一次精錬完了後の溶鋼を、真空槽を使い脱炭、脱ガス(水素・窒素)、脱酸する。また、真空槽と取鍋の間で溶鋼を還流させることで、脱ガス処理の高効率化を実現している二次精錬設備である。

RHの工事計画における目的関数と制約条件は、以下に示す通りである。

(1) 目的関数

- ・残業時間の最小化
- ・施工クルー増員の最小化
- ・搬送の手間(場所の移動)の最小化

(2) 制約条件

- ・修繕の種別毎に、要求される修繕の内容に沿った所要時間の確保が必要
- ・修繕の種別毎に、要求される作業場所の確保が必要(図5、図6)
- ・修繕の種別毎に、要求される能力を持った施工クルーが必要(表1)
- ・納期は絶対遵守が必要

* 日本製鉄(株) 小林敬和氏との共同開発



図5: RH下部槽修理場レイアウト

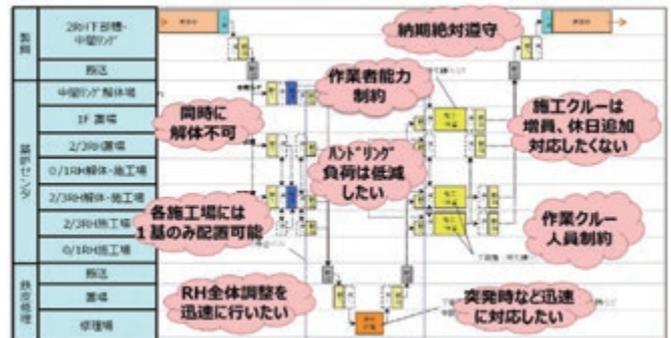


図6: 工事計画問題概要イメージ

表1: 要求される作業スキルと所要人数

修繕対象	作業スキル			
	搬入出	解体	施工	検査
耐火物	2名	2名	4名	1名
鉄皮	2名		3名	1名

開発した独自ツールを用いて工事計画における制約条件や目的関数を登録して、数理最適化モデルを自動生成し最適な計画を自動作成する。これを使って、設備・置場・施工クルーの適切な割当を実現することができた。その結果、納期遵守率100%、施工クルーの休日対応削減など、熟練者と同等以上の良好な結果を得ることができた(図7)。

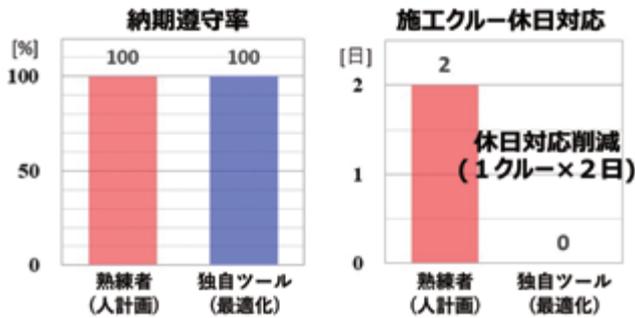


図7: 熟練者との比較検証結果

4. 今後の展開

AIの基盤技術の1つである数理最適化を活用したソリューションにより、前述の通り熟練者と同等以上の計画を自動作成

することで、人によるバラツキもなく、経験の浅い若手の計画担当者でも最適な計画作成が可能となる。また、ニューノーマル時代における真の働き方改革においても、さらなる業務効率化による生産性向上は重要課題であり、当該ソリューションによる属人性排除や業務負荷低減は、非常に有用となる。一方、鉄鋼業をはじめとした製造業では、今後も現有設備の効率的な利用や省エネ、コスト切下げが重要課題であり、生産・物流における様々な計画問題への適用実績(図8)を基盤にお客様へ迅速・柔軟なソリューション提供を図っていく。さらにDXによるデジタル化によって様々なデータを一元・一貫化し、リアルタイムな3D表示や最適シミュレーション、現場へのタイムリーな実行指示による最適運用、安定操業に資するデジタルツインソリューション(図9)の適用拡大を推進していく。

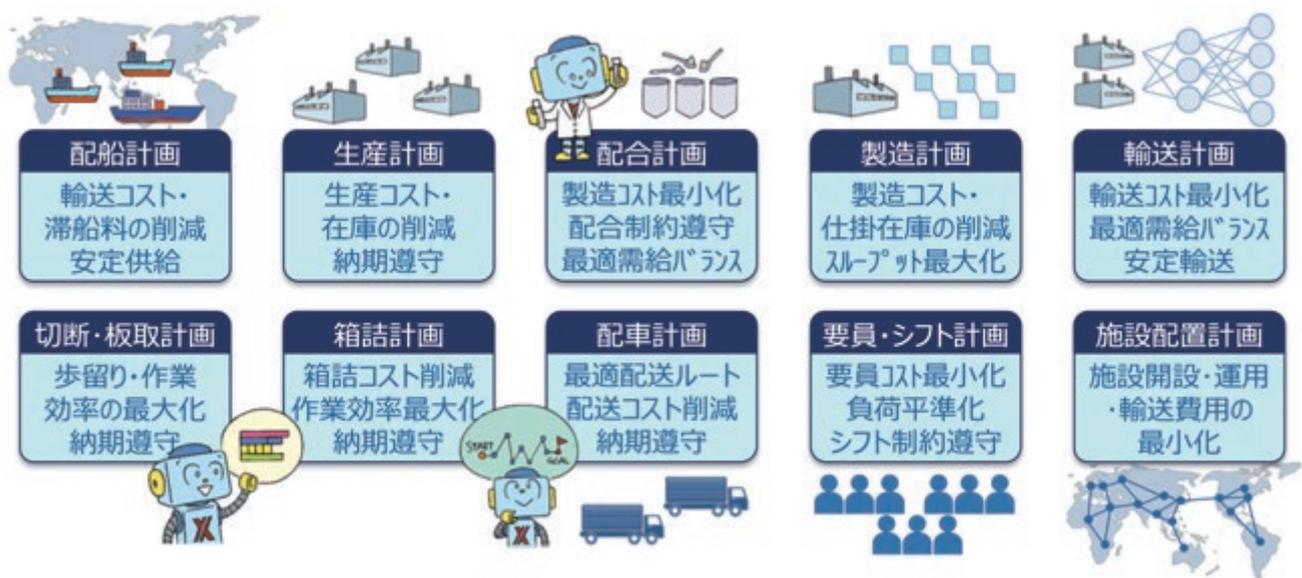


図8: 最適化ソリューションの適用例

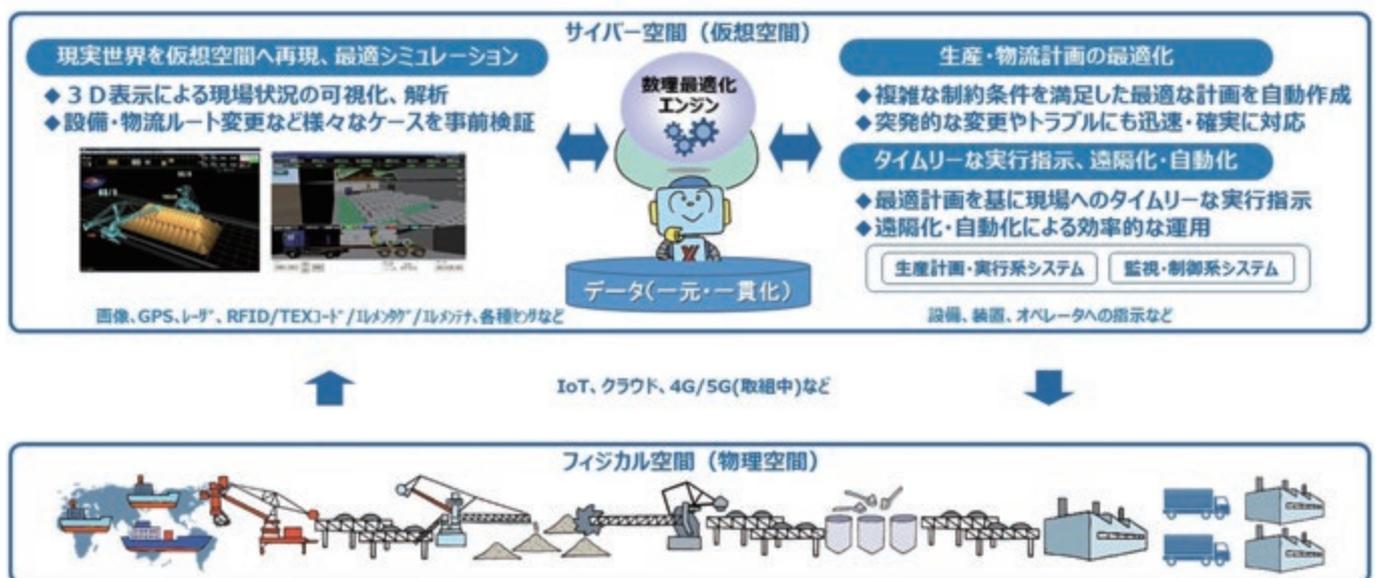


図9: 当社独自のデジタルツインソリューション

5. おわりに

本稿では、生産・物流最適化技術における開発内容とその適用事例、今後の展開について紹介した。

今後もデジタルトランスフォーメーションの進展により、工程間や工場間、組織間や関係企業間がつながり融合し、部分最適から全体最適による新たな付加価値創出の可能性が広がる。また、近年の不確実性の時代においては、タイムリーな意思決定を支援する仕組みづくり、企業変革力の強化が重要となる。これらお客様が抱える課題の本質を捉え、ベストパートナーとして成長・進化を支えるAI・最適化ソリューションの提供を推進していく。

参考文献

1) 中川繁政, 伊藤邦春, 小林敬和, 吾郷正俊, 鷺北芳郎, 古川昭仁: 鉄鋼生産プロセスにおけるOR手法の適用事例; 日本オペレーションズ・リサーチ学会シンポジウム; (2019)

お問い合わせ先

電計事業本部 システムソリューション事業部
DX推進部オペレーションズリサーチグループ
TEL 093-288-5080